

Галиев Радик Мирзашаехович

**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ
КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Набережные Челны 2002

Работа выполнена в Ижевском государственном техническом университете и Камском государственном политехническом институте.

Научный руководитель: доктор технических наук
Н.М. Филькин.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Х.А. Фасхиев;
кандидат технических наук,
доцент В.В. Сазонов.

Ведущая организация: ОАО «КАМАЗ» (г. Набережные Челны).

Защита состоится 21 июня 2002 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К212.309.01 в Камском государственном политехническом институте по адресу: 423810 г. Набережные Челны, пр. Мира, дом 68/19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Камского государственного политехнического института.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью) просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, дом 68/19, диссертационный совет К 212.309.01.

Автореферат разослан «___» _____ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

А.З. Асанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Автомобили, оборудованные двигателями внутреннего сгорания (ДВС), расходуют большое количество моторного топлива и выбрасывают в окружающую среду вредные вещества с отработавшими газами. Особенно остро стоит проблема экологии в крупных городах и около автомагистралей. При этом рост выбросов от автомобильного транспорта происходит опережающими темпами, и его доля в выбросах вредных веществ транспортного комплекса составляет 89%.

Повышающиеся требования к топливной экономичности и экологической безопасности автомобиля заставляют конструкторов искать нетрадиционные решения этой проблемы.

Одним из эффективных направлений в решении указанных проблем является применение электропривода в конструкциях автомобиля. В последние годы четко обозначились два направления развития автомобилей с электромеханическими приводами: первое - создание чистого электромобиля, второе - разработка электромеханического привода с комбинированной (гибридной) энергетической установкой. Из-за отсутствия доступных для массового производства эффективных накопителей электрической энергии чистые электромобили имеют относительно малые пробеги на одной зарядке. Это и является одной из основных причин исследований возможности и эффективности использования в конструкциях автомобилей комбинированных энергетических установок (КЭУ), состоящих из двух двигателей (обычно ДВС и электродвигатель) и накопителя энергии.

Комбинированные энергосиловые установки (КЭСУ), включающие КЭУ и силовой привод, позволяют более эффективно использовать энергию при выполнении заданного объема работ. В связи с этим, данное научное направление актуально.

Цель работы - разработка метода обоснования выбора параметров конструкции КЭСУ легкового автомобиля параллельной компоновочной схемы ДВС и электродвигателя, работающих на один выходной вал.

Задачи исследований. Сформулированная цель и проведенный анализ нерешенных проблем по теме диссертации позволили определить следующие основные задачи исследования диссертационной работы:

- выбрать рациональную схему КЭСУ для легкового автомобиля;
- разработать математические модели движения автомобиля, оборудованного КЭСУ, в различных условиях его эксплуатации;
- для легкового автомобиля выбрать и обосновать основные конструктивные и мощностные параметры и характеристики КЭСУ по показателям топливо-скоростных свойств;
- обосновать наиболее рациональный алгоритм управления ДВС и электродвигателем;
- провести экспериментальные исследования автомобилей с КЭСУ, подтверждающие адекватность разработанных математических моделей и эффективность применения КЭСУ в конструкциях легковых автомобилей;
- разработать рекомендации по созданию КЭСУ для легкового автомобиля.

Методы исследований. Решение поставленных задач базируется на теории движения, эксплуатационных свойствах, методах математического моделирования динамики и экспериментальных исследованиях автомобиля.

Достоверность и обоснованность. Достоверность принятых в диссертационной работе решений подтверждается согласованностью теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований, полученных в лабораторных условиях открытого акционерного общества (ОАО) «ИжАвто» и на дорогах общего пользования Удмуртии на экспериментальном легковом автомобиле с КЭСУ.

Научную новизну работы составляют:

- разработка метода выбора наиболее рациональных конструктивных и мощностных параметров комбинированной энергосиловой установки параллельной компоновочной схемы ДВС и электродвигателя, работающих на один выходной вал;
- разработка математических моделей движения автомобиля, оборудованного КЭСУ;
- разработка конструктивной схемы бесступенчатой электромеханической трансмиссии для легкового автомобиля и проведении анализа ее динамики работы;
- обоснование наиболее рационального алгоритма управления КЭСУ;
- разработка рекомендаций по созданию КЭСУ для легкового автомобиля;
- создание экспериментального образца легкового автомобиля с КЭСУ.

Практическая ценность. Внедрение в практику проектирования разработанного метода выбора и обоснования конструктивных и мощностных параметров и характеристик КЭСУ позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства легкового автомобиля (топливная экономичность, экологичность), что подтверждается результатами экспериментальных исследований опытных образцов, а также уменьшить время создания КЭСУ.

Реализация результатов. Результаты теоретических исследований, а также разработанный метод обоснования и выбора параметров конструкции КЭСУ используются в управлении главным конструктора ОАО «ИжАвто», в Департаменте развития и внедрения новых разработок (ДР и ВНР) ОАО «КАМАЗ» при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию гибридных легковых автомобилей и в учебном процессе Камского государственного политехнического института (КамПИ). Расчетные исследования диссертационной работы были реализованы в опытных образцах гибридных автомобилей, что позволило повысить топливную экономичность в среднем на 25-31% и уменьшить выбросы токсичных веществ на 35-40% в сравнении с серийно выпускаемыми легковыми автомобилями.

Апробация работы. Результаты исследований доложены на XXXI и XXXII научно-технических конференциях ИжГТУ (г. Ижевск, 1999-2000 г.г.), на Международных конференциях Балттехмаш-2000 (г. Калининград, КГТУ, 2000); «Автомобиль и техносфера» (JCATS'2001) (Казань, КГТУ-КАИ, 2001) и на отчетной конференции-выставке подпрограмм 205 «Транспорт» научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». Диссертация

рассмотрена на межвузовской кафедре ИжГТУ-УдГУ «Дизайн промышленных изделий и наземные транспортные системы» и на кафедре «Автомобили» КамПИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано семь печатных работ и два научно-исследовательских отчета.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов, списка литературы (142 наименования) и приложения.

Общее количество страниц в диссертационной работе 170. Основная часть содержит 165 страниц текста, в том числе 42 рисунка и 19 таблиц. Приложение состоит из 5 страниц, включает 2 рисунка, 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научная проблема, цель, научная новизна, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ рынка легковых автомобилей, современного состояния вопросов влияния автомобильного транспорта на окружающую среду, обзор работ по силовым приводам автомобилей, конструкциям энергосиловых установок автомобилей и перспектив их применения.

Максимальная мощность ДВС у современных легковых автомобилей превышает 50 кВт, а иногда и 100 кВт, тогда как для легкового автомобиля класса *B, C* расходуется на перемещение из начала в конец маршрута в среднем не более 15 кВт. При торможении теряется от 15 до 60% кинетической энергии, передаваемой автомобилю двигателем. Доля этой потери зависит от типа автомобиля и условий движения (помехи движению, состояние дорожного покрытия, профиль и план дороги и т.п.). Если эту энергию аккумулировать и потом использовать для разгона или в других целях, то расход топлива автомобилем можно снизить на 20%.

Основная цель использования комбинированных энергосиловых установок в конструкциях автомобилей следующая:

- возможность применить ДВС меньшей мощности (на 25-50 %), т.к. при разгоне энергия поступает дополнительно от электрического двигателя;

- повышение коэффициента использования мощности ДВС за счет возможности реализации его работы на наиболее экономичных режимах; снижение количества выбрасываемых в атмосферу токсичных веществ, которые по литературным данным оцениваются в 50 - 85% и более;

- уменьшение расхода топлива;

- возможность аккумулирования рекуперированной энергии торможения и замедления движения автомобиля;

- возможность реализации высоких динамических показателей автомобиля при использовании бесступенчатой или малоступенчатой системы привода ведущих колес;

- облегчение управления автомобилем за счет возможного создания бесступенчатых автоматических электромеханических трансмиссий.

Над созданием автомобилей с комбинированными энергосиловыми установками работает ряд фирм: «Toyota» начала выпускать автомобили «Prius»; фирма «VAG» создала опытные образцы автомобилей «Audi 100» и «Golf»; над подобным проектом работают «Mercedes-Benz», «BMW» и др.

Во второй главе рассмотрены структурные схемы комбинированных энергосиловых установок для легкового автомобиля и обоснована наиболее рациональная схема.

В настоящее время наиболее распространенной конструкцией комбинированной энергосиловой установки является последовательное соединение: ДВС-генератор-электродвигатель-двигатель автомобиля. Между генератором и электродвигателем параллельно соединяется накопитель энергии. Такая конструкция, обладая непрерывностью и автоматичностью регулирования, позволяет наиболее рационально использовать ДВС (малый диапазон работы). Наряду с преимуществами эта конструкция имеет следующие недостатки: при передаче всей энергии ДВС на ведущие колеса автомобиля происходит трехкратное и более преобразование этой энергии. Очевидно, что каждое преобразование энергии сопровождается ее потерями, следовательно, снижается КПД энергосиловой установки. Поэтому в таких КЭСУ используются электрические машины с повышенной суммарной мощностью, чем и обуславливаются их большие габаритные размеры. Кроме того, надежность этой конструктивной схемы зависит от надежности работы электродвигателя и генератора, т.е. при выходе из строя электродвигателя продолжать движение автомобиля невозможно, а при неисправности генератора возможно передвижение на небольшое расстояние в зависимости от энергоемкости накопителя энергии.

Возможны и другие конструктивные схемы КЭСУ, с параллельным соединением ДВС и электродвигателя в КЭУ. В этом случае крутящие моменты от двигателя через редуктор могут передаваться суммарно или отдельно по выбору или в зависимости от режимов и условий движения. Иными словами, данная конструктивная схема позволяет использовать достоинства каждого из типов двигателей КЭУ для компенсации недостатков двигателя другого типа. Так, ДВС на высоких частотах вращения коленчатого вала развивает мощности, обеспечивающие автомобилю большие скорости движения, но не обеспечивает хорошей динамики разгона. Электродвигатель же на малых частотах вращения вала развивает большие крутящие моменты. Поэтому, чтобы сократить время разгона автомобиля, мощность ДВС дополняется мощностью электродвигателя, получаемой от накопителя энергии, продолжать же движение с установившимися и близкими к ним скоростями возможно только на ДВС. В этом случае для получения хорошей динамики разгона отпадает необходимость многократного преобразования большей части энергии и представляется возможность использовать менее мощные и материалоемкие ДВС, электродвигатель. Кроме того, все это существенно улучшает топливную экономичность автомобиля, повышает надежность и долговечность агрегатов силовой установки.

Следовательно, при проектировании гибридного автомобиля наиболее предпочтительна конструктивная параллельная схема КЭУ.

В общем случае КЭУ автомобиля параллельной компоновочной схемы по способу передачи мощности от ДВС и электродвигателя к ведущим колесам разделяются: ДВС и электродвигатель соединены через шестеренчатый, ременный, цепной или другой подобный механический редуктор и работают на один выходной вал КЭУ (на рис. 1 изображена такая схема для автомобиля с колесной формулой 4×2); поосевое разделение передаваемой мощности от ДВС и электродвигателя, например, электродвигатель приводит в движение колеса задней оси, а ДВС - передней, т.е. автомобиль имеет колесную формулу 4×4 ; замыкание мощностных потоков от ДВС и электродвигателя на выходной вал КЭУ через дифференциальный редуктор (рис. 2).

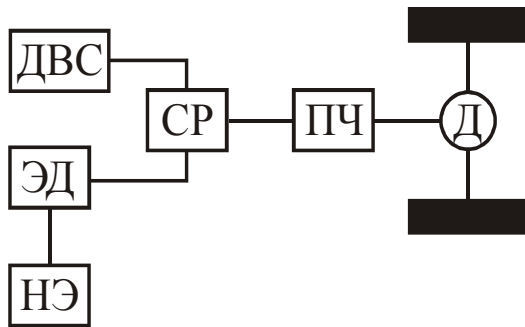


Рис. 1. Структурная схема гибридного автомобиля с параллельным соединением ДВС и электродвигателя, работающих на один выходной вал

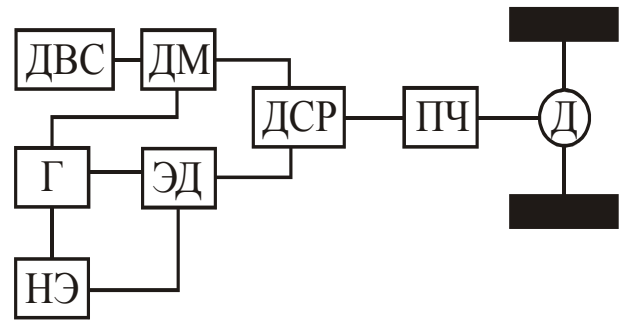


Рис. 2. Структурная схема гибридного автомобиля с замыканием мощностных потоков от ДВС и электродвигателя через дифференциал

Выходным валом КЭУ для схемы, представленной на рис.1, является выходной вал согласующего редуктора (СР), с которого поток мощности поступает на ведущие колеса автомобиля. За выходным валом обычно находится муфта сцепления. Для увеличения и изменения передаваемого крутящего момента между выходным валом и ведущими колесами, как правило, ставится коробка передач и редуктор, а далее межколесный дифференциал (Д). Участок от выходного вала КЭУ до дифференциала назовем преобразующей частью (ПЧ). Для согласования частот вращения валов ДВС и электродвигателя (ЭД) они соединяются между собой через согласующий редуктор с некоторым передаточным числом. Движение автомобиля с постоянными и близкими к ней скоростями в данном случае осуществляется за счет мощности ДВС, передаваемой к ведущим колесам по цепи ДВС-СР-ПЧ-Д. Во время динамичного разгона автомобиля к ведущим колесам поступает дополнительная энергия от накопителя энергии (НЭ) по цепи НЭ-ЭД-СР-ПЧ-Д. При необходимости зарядки накопителя энергии в режиме движения с установившимися скоростями и близкими к ней происходит передача энергии по цепи ДВС-СР-ЭД-НЭ, т.е. ЭД переходит в режим работы генератора. Движение накатом и торможение сопровождается рекуперацией энергии по цепи Д-ПЧ-СР-ЭД-НЭ. Есть возможность передвигаться по городу, где экологические требования высокие, при выключенном ДВС, тогда энергия поступает только от ЭД по цепи НЭ-ЭД-СР-ПЧ-Д.

С точки зрения согласования работы ДВС и ЭД возможна и другая конструкция КЭСУ параллельной компоновочной схемы, которая позволяет уменьшить динамические нагрузки в согласующем редукторе и снизить диссипативные потери энергии в трансмиссии. Структурная схема гибридного автомобиля с такой КЭСУ представлена на рис. 2. В этом случае КЭСУ представляет собой замкнутую дифференциальную передачу, позволяющую передавать мощность от ДВС к ведущим колесам после делителя мощности (ДМ) двумя потоками. Замыкание мощностных потоков от ДВС и ЭД осуществляется за счет введения в конструкцию дифференциального согласующего редуктора (ДСР), что создает дополнительные возможности для автоматизации электромеханической передачи. Большая часть мощности от ДВС на ДСР идет по цепи с постоянным передаточным отношением ДВС - ДМ - ДСР. Другая часть мощности поступает на ДСР через генератор (Г) и ЭД, который работает под управлением электронного блока как вариатор.

В данных конструктивных схемах, которые показаны на рис. 1 и 2, отсутствует стартер, так как запуск ДВС осуществляется соответственно по цепям НЭ-ЭД-СР-ДВС и НЭ-ЭД-ДСР-ДМ-ДВС при неподвижном состоянии выходного вала.

В третьей главе разработаны структурные схемы и математические модели движения автомобиля, оборудованного КЭСУ с параллельным соединением ДВС и электродвигателя, работающих на один выходной вал. Рассматривались разнотипные согласующие редукторы: шестеренчатый, цепной и ременный. При разработке математических моделей работы автомобиля в целом энергетическая установка рассматривалась отдельно от всех других составляющих (агрегатов) автомобиля, т. е. схематично автомобиль в этом случае можно представить как комбинацию ее двух частей - энергетической установки и механической части, соединенных между собой некоторой активной силовой связью $F(\varphi_M, \dot{\varphi}_M, \ddot{\varphi}_M)$.

Подобный подход к разработке математических моделей автомобиля позволяет использовать уже имеющиеся наработки (математические модели отдельных частей автомобиля), что сокращает существенно время написания систем дифференциальных уравнений. Особенно это сказывается при проработке различных конструктивных решений, например, для заданной конструкции механической части автомобиля перебираются различные конструктивные схемы КЭУ.

Силовое взаимодействие этих частей осуществляется обычно между выходными элементами энергетической установки (выходной вал, ведущие детали муфты сцепления и т. п.) и входными элементами механической части автомобиля (входной вал, ведомые детали муфты сцепления и т. п.). Силовая связь при математическом описании работы автомобиля может иметь сложный характер и представлять собой сумму крутящих моментов, зависящих как от обобщенных координат соединяемых элементов, так дополнительно и от их скоростей и ускорений.

КЭУ могут существенно отличаться друг от друга по составу и типу входящих в них агрегатов. Для ограничения предельно допустимых значений нагрузок за выходным валом КЭУ при нештатных или аварийных ситуациях и

для отключения при необходимости одного из двигателей, входящих в КЭУ, могут использоваться муфты сцепления и предохранительные муфты. В соответствии с выбранной компоновочной схемой двигателей разработана структурная схема динамической модели работы КЭУ, изображенной на рис.3.

Обозначения на структурной схеме (рис. 3) следующие:

$M_{дв}^1, M_{дв}^2$ - соответственно текущие крутящие моменты ДВС и ЭД;

$J_{дв1}, J_{дв2}$ - суммарные моменты инерции вращающихся деталей соответственно ДВС и ЭД;

$J_{ред}^{вх1}, J_{ред}^{вх2}, J_{ред}^{вых}$ - приведенные моменты инерции соответственно ведомых деталей муфт ДВС и ЭД и выходного вала редуктора;

$\Delta_1^{cy}, \Delta_2^{cy}, C_{cy1}, C_{cy2}, K_{cy1}, K_{cy2}$ - соответственно суммарные зазоры, коэффициенты угловой жесткости и демпфирования упруго-демпфирующих участков КЭУ.

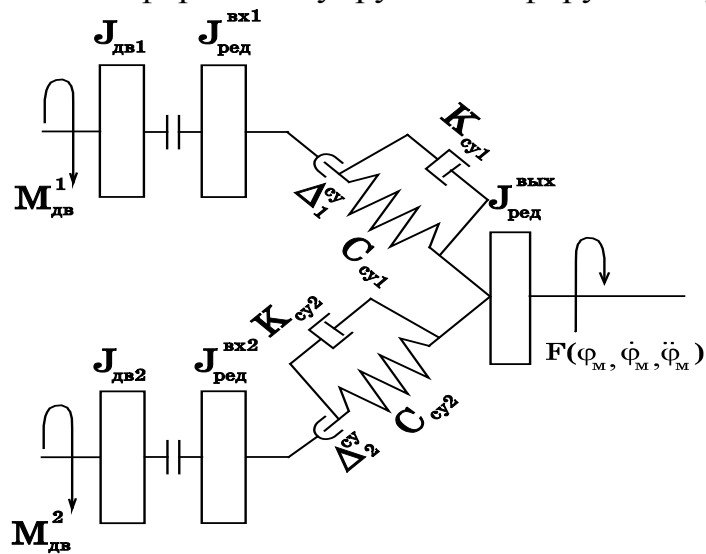


Рис. 3. Упрощенная схема динамической модели комбинированной энергетической установки

Уравнение Лагранжа второго рода позволяет записать систему дифференциальных уравнений, описывающую работу КЭУ (рис.3), в следующем виде (например: с обеими заблокированными муфтами):

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{дв1} + J_{ред}^{вх1})\ddot{\phi}_{дв1} = M_{дв}^1 - M_{всп} - M_{тp1}^{cy} - \frac{d\Pi_{КЭУ}}{d\phi_{ред}^{вх1}} - \frac{d\Phi_{КЭУ}}{d\dot{\phi}_{ред}^{вх1}} \\ \ddot{\phi}_{ред}^{вх1} = \ddot{\phi}_{дв1} \\ (J_{дв2} + J_{ред}^{вх2})\ddot{\phi}_{дв2} = M_{дв}^2 - M_{тp2}^{cy} - \frac{d\Pi_{КЭУ}}{d\phi_{ред}^{вх2}} - \frac{d\Phi_{КЭУ}}{d\dot{\phi}_{ред}^{вх2}} \\ \ddot{\phi}_{ред}^{вх2} = \ddot{\phi}_{дв2} \\ J_{ред}^{вых}\ddot{\phi}_{ред}^{вых} = -\frac{d\Pi_{КЭУ}}{d\phi_{ред}^{вых}} - \frac{d\Phi_{КЭУ}}{d\dot{\phi}_{ред}^{вых}} - F(\phi_M, \dot{\phi}_M, \ddot{\phi}_M), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\Pi_{КЭУ}$ - потенциальная энергия КЭУ;

$\Phi_{КЭУ}$ - диссипативная функция КЭУ, характеризующая уменьшение энергии с течением времени;

$M_{всп}$, $M_{тр}^{сy}$ - крутящие моменты соответственно для привода вспомогательного оборудования машины и преодоления сил трения на различных упруго-демпфирующих участках КЭУ;

$\varphi_{ред}$, $\dot{\varphi}_{ред}$, $\ddot{\varphi}_{ред}$ - соответственно угол поворота, частота вращения, ускорение деталей СР и ведущих деталей сцепления, соединяющего КЭУ с другими агрегатами силовой установки;

$\varphi_{дв1}$, $\dot{\varphi}_{дв1}$, $\ddot{\varphi}_{дв1}$, $\varphi_{дв2}$, $\dot{\varphi}_{дв2}$, $\ddot{\varphi}_{дв2}$ - соответственно угол поворота, частота вращения, ускорение ДВС и ЭД;

$\varphi_{ред}^{вх1}$, $\dot{\varphi}_{ред}^{вх1}$, $\ddot{\varphi}_{ред}^{вх1}$ - соответственно угол поворота, частота вращения, ускорение ведомых деталей муфты ДВС;

$\varphi_{ред}^{вх2}$, $\dot{\varphi}_{ред}^{вх2}$, $\ddot{\varphi}_{ред}^{вх2}$ - соответственно угол поворота, частота вращения, ускорение ведомых деталей муфты ЭД;

$i_{ред1}$, $i_{ред2}$ - соответственно передаточное отношение редуктора со стороны ДВС и ЭД.

Механическая часть автомобиля описывается четырьмя дифференциальными уравнениями, которые добавляются к системе уравнений (1). При этом задается функциональная связь $F(\varphi_m, \dot{\varphi}_m, \ddot{\varphi}_m)$ между КЭУ и механической частью, которая представляет собой крутящий момент в муфте сцепления.

Для рассматриваемой энергетической установки возможны следующие режимы работы: 1) аварийный режим работы (муфты сцепления буксуют, крутящий момент на выходном валу энергетической установки меньше необходимого для преодоления силовой связи $F(\varphi_m, \dot{\varphi}_m, \ddot{\varphi}_m)$, т.е. приведенная масса с моментом $J_{ред}^{вых}$ неподвижна); 2) работа с буксующими муфтами электродвигателя и ДВС (приведенная масса с моментом $J_{ред}^{вых}$ вращается); 3) работа с заблокированной муфтой ДВС и буксующей муфтой ЭД; 4) работа с буксующей муфтой ДВС и заблокированной муфтой ЭД; 5) работа с обеими заблокированными муфтами.

В аварийном случае возможны первый, третий, четвертый режимы работы, когда на предохранительных муфтах от действия силовой связи $F(\varphi_m, \dot{\varphi}_m, \ddot{\varphi}_m)$ возникнет динамический крутящий момент, превышающий сумму $\beta_{сц}^1 M_{\max}^1 + \beta_{сц}^2 M_{\max}^2$, где $\beta_{сц}^1$, $\beta_{сц}^2$ - коэффициенты запаса (обычно выбираются из условия, чтобы при всех возможных перегрузках отсутствовала бы пробуксовка для фрикционных муфт и разрушение для жестких муфт) предохранительных муфт; M_{\max}^1 , M_{\max}^2 - максимальные моменты установленных двигателей. При установлении жестких предохранительных муфт велика вероятность их разрушения.

Рассмотренная выше математическая модель справедлива для согласующих редукторов, в которых используются передачи зацеплением, например, зубчатые и червячные с непосредственным контактом вращающихся

тел, передающих крутящие моменты, и передачи с гибкой связью – цепные и зубчатоременные.

В КЭУ в качестве согласующего редуктора может применяться ременная передача, которая относится к передачам с гибкой связью. Разработаны структурные схемы и динамические модели с ременным согласующим редуктором. При математическом моделировании этой схемы надо учитывать крутящие моменты при буксовании ведущих ветвей ремней ДВС и ЭД по ведущим шкивам и ведомых ветвей этих же ремней по ведомому шкиву, потери при буксовании, определяемые экспериментально или по эмпирическим формулам в зависимости от конструкции ремня и шкивов, площади поперечного сечения ремня, скорости движения его частиц и других факторов. Наиболее сложные математические модели движения автомобиля соответствуют ременному согласующему редуктору.

В четвертой главе приведены расчетные исследования разрабатываемой КЭСУ легкового автомобиля с выбранной схемой. При расчетах рассматривались показатели расхода топлива, выбросов вредных веществ с отработавшими газами, тягово-скоростных свойств.

Экономичность использования энергии оценивалась показателями расходов энергии в ездовых циклах: европейский городской (ОСТ 37.001.054-86); американский магистральный HIGHWAY; американский городской (методика государственных испытаний США FTP); магистральный городской циклы, разработанные в НАМИ (ГОСТ 20306-85).

Выбор мощностных параметров и характеристик электродвигателя для чистого электроавтомобиля должен базироваться на основных конструктивных параметрах и характеристиках, а также на требованиях, предъявляемых к тягово-скоростным свойствам и показателям экономичного использования энергии автомобилем. Одним из основных параметров тягово-скоростных свойств, влияющих на мощностные показатели выбираемого ЭД, является максимальная скорость движения электроавтомобиля. Разрешенная максимальная скорость вне города 90 км/ч, тогда необходимая мощность для исследуемого автомобиля ИЖ-21261 будет равна 12.77 кВт.

Затраты энергии при движении в ездовых циклах автомобиля ИЖ-21261:

- европейский ездовой цикл (ОСТ 37.001.054-86): расход энергии на 100 км пути 9,50 кВт·ч, средняя скорость за цикл 18,73 км/ч, продолжительность цикла 195 с, суммарный пробег за цикл 1,0145 км;

- американский магистральный ездовой цикл HIGHWAY: расход энергии на 100 км пути 12,38 кВт·ч, средняя скорость за цикл 77,6457 км/ч, продолжительность цикла 765 с, суммарный пробег за цикл 16,4997 км;

- американский городской ездовой цикл (методика государственных испытаний США FTP): расход энергии на 100 км пути 7,72 кВт·ч, средняя скорость за цикл 19,5425 км/ч, продолжительность цикла 1371 с, суммарный пробег за цикл 7,4424 км;

- городской ездовой цикл (ГОСТ 20306-85): расход энергии на 100 км пути 10,507 кВт·ч;

- магистральный ездовой цикл (ГОСТ 20306-85): расход энергии на 100 км пути 12,1 кВт·ч.

Выбор внешних скоростных характеристик ДВС и электродвигателя базировался на необходимой энергии, затрачиваемой в различных ездовых циклах, и дополнительно на условии, что ДВС должен обеспечивать движение автомобиля с КЭСУ со скоростью не менее 90 км/ч, а электродвигатель – приемлемые тягово-скоростные свойства при разгоне.

Для ускорения создания гибридного автомобиля были выбраны ДВС и электродвигатель с характеристиками, близкими к расчетным. В качестве ДВС выбран ВАЗ-1111 (номинальная мощность 22 кВт, максимальный крутящий момент 44.1 Н·м), в качестве электродвигателя - электродвигатель постоянного тока ПТ-125-12 (напряжение питания якоря 120 В при токе якоря не более 120 А, крутящий момент 49 Н·м).

Для улучшения тягово-скоростных свойств исследуемого автомобиля ИЖ-21261 проведены расчеты, подтверждающие необходимость введения коробки передач. Были также рассчитаны оптимальные передаточные числа и количество ступеней трансмиссии для ИЖ-21261 с выбранной КЭУ.

Для удобства сравнения автомобилей, оборудованных различными агрегатами трансмиссии, некоторые показатели тягово-скоростных свойств для передаточного числа главной передачи 3,91 сведены в табл. 1. Обозначения в этой таблице: автомобиль №1 – ИЖ-21261, оборудованный КЭУ без коробки передач; автомобиль №2 – ИЖ-21261, оборудованный КЭУ и двухступенчатой коробкой передач; автомобиль №3 – ИЖ-21261, оборудованный КЭУ и трехступенчатой коробкой передач; автомобиль №4 – ИЖ-21261, выпускаемый в настоящее время и имеющий двигатель внутреннего сгорания мощностью более 54 кВт и пятиступенчатую коробку передач. Передаточные числа двух- и трехступенчатой коробок определялись из условия достижения скорости 80 км/ч за наименьшее время.

Таблица 1 - Показатели тягово-скоростных свойств автомобилей различной комплектации

Тягово-скоростной показатель	Автомобиль №1	Автомобиль №2	Автомобиль №3	Автомобиль №4
Время разгона до скоростей, с:				
20 км/ч	5.834	2.110	1.414	1.800
30 км/ч	8.657	3.549	3.190	2.721
40 км/ч	11.535	6.437	5.867	3.696
50 км/ч	14.562	9.463	8.893	5.163
60 км/ч	18.329	13.232	12.662	6.690
70 км/ч	23.559	18.465	17.896	8.344
80 км/ч	32.366	27.324	26.755	10.221
Время разгона на пути 1000 м, с	56.010	51.670	51.168	37.019
Максимально возможный преодолеваемый подъем, %	10.447	26.850	51.934	42.082
Максимально возможное ускорение, м/с ²	1.004	2.468	4.380	3.033

Для ускоренного создания макетного образца выбор передаточного числа главной передачи базировался на возможности применения главной передачи, выпускаемой в настоящее время с передаточным числом 3.91, и наличии на предприятии главных передач, выпускаемых ранее с передаточными отношениями 4.22 и 4.55. За основу коробки передач взята серийно выпускаемая в настоящее время коробка передач с рядом передаточных чисел: 3.19, 1.864, 1.329, 1, 0.806.

В дальнейших расчетных исследованиях проведен сравнительный анализ двух вариантов трехступенчатых коробок передач. Первый вариант получается из серийной пятиступенчатой коробки передач путем удаления из конструкции второй и пятой передач, а во втором варианте удалены третья и пятая передачи. Соответствующие ряды передаточных чисел $i_1=3.19$, $i_2=1.329$, $i_3=1$ и $i_1=3.19$, $i_2=1.864$, $i_3=1$. Для более детального анализа динамики разгона на рис. 4 совмещены зависимости ускорения автомобиля от скорости разгона для рассматриваемых вариантов трехступенчатых коробок передач.

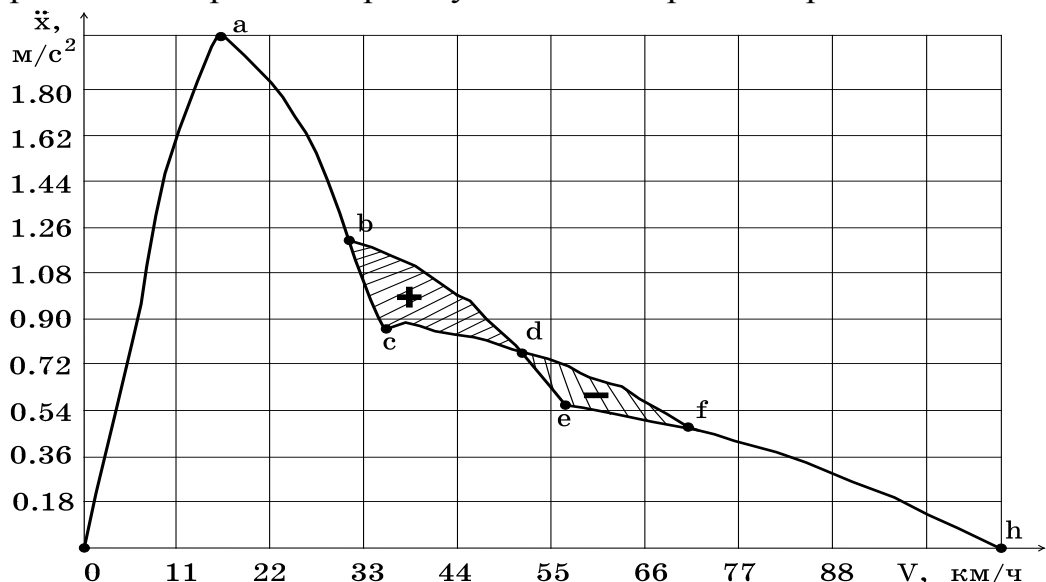


Рис. 4. Сравнительный анализ динамики разгона автомобиля, оборудованного двумя вариантами трехступенчатых коробок передач

Площадь заштрихованного криволинейного треугольника b-c-d, помеченная знаком плюс, численно характеризует превосходство второго варианта над первым по динамике разгона, а площадь криволинейного треугольника d-e-f, помеченная знаком минус, - недостаток этого варианта. Явно большая площадь треугольника b-c-d в сравнении с площадью треугольника d-e-f также говорит о предпочтении второму варианту коробки передач.

Управлять работой КЭУ должна пускорегулирующая аппаратура (электронный блок). При этом программа управления зависит от требований к показателям экологичности, экономичности и тягово-скоростных свойств проектируемого автомобиля. В соответствии с проведенными исследованиями желательно, чтобы система управления реализовывала следующие режимы движения: автомобиль движется на аккумуляторных батареях на малых и средних скоростях; автомобиль движется на ДВС на квазиустановившихся режимах и при разгонах на высоких частотах вращения вала ДВС

(электрическая часть энергетической установки отключена); автомобиль движется на ДВС квазиустановившихся режимах и параллельно идет зарядка аккумуляторных батарей (ЭД работает в режиме генератора); разгон автомобиля на ДВС и ЭД; рекуперация энергии при торможении и замедлении (ЭД работает в режиме генератора); стоянка автомобиля. В качестве определяющих параметров взяты: частота вращения вала КЭУ, значение угла открытия дроссельной заслонки, скорость движения и ускорение автомобиля. Эти требования к работе ДВС и ЭД в зависимости от контролируемых параметров представлены в табл. 2. В качестве предельного угла открытия дроссельной заслонки взят угол, равный 90 %, т.е. считаем, что дальнейшее увеличение открытия дроссельной заслонки приводит к неэкономичным режимам работы ДВС.

Таблица 2 - Состояние ЭД и ДВС в зависимости от ряда контролируемых параметров

№ п/п	Частота вращения вала n_e , рад/с	Значение угла открытия дроссельной заслонки U_g , %	Значение скорости движения автомобиля V , км/ч	Значение ускорения автомобиля J , м/с ²	Состояние ЭД	Состояние ДВС
1	Любые	$U_g < 90$	Любые	$J < -0.2$	Рекуперация	Отключен
2	Любые	$U_g < 90$	$V < 20$	$-0.2 < J < 0.2$	Работает	Отключен
3	Любые	$U_g < 90$	$V < 20$	$J > 0.2$	Работает	Отключен
4	Любые	$U_g < 90$	$V > 20$	$-0.2 < J < 0.2$	Идет зарядка НЭ	Работает
5	$n_e < 434$	$U_g < 90$	$V > 20$	$J > 0.2$	Работает	Работает
6	Любые	$U_g > 90$	$V < 20$	Любые	Работает	Отключен
7	Любые	$U_g > 90$	$V > 20$	Любые	Работает	Работает
8	$n_e > 434$	$U_g < 90$	$V > 20$	$J > 0.2$	Отключен	Работает
9	Любые	$U_g = 0$	Любые	$J > 0.2$	Рекуперация	Отключен

Были проведены расчетные исследования топливо-скоростных свойств. Для большей наглядности полученных расчетных исследований на рис. 5 представлены соответствующие гистограммы показателей расхода топлива (здесь расход энергии на режиме разгона не учитывался).

Энергии от рекуперации в процессе режима движения замедление-торможение будет недостаточно для компенсации электрической энергии, потраченной в режиме разгона. Поэтому часть механической энергии, вырабатываемой ДВС, будет тратиться на подзарядку накопителя энергии при движении автомобиля с постоянными и близкими к ним скоростями. В соответствии с проведенным анализом, это приведет к ухудшению показателей топливной экономичности гибридного автомобиля (рис. 5) не более чем на 10-15 %. Поэтому сделан следующий вывод: реализация в конструкциях легковых автомобилей КЭУ позволит повысить топливную экономичность этих автомобилей до 40 %.

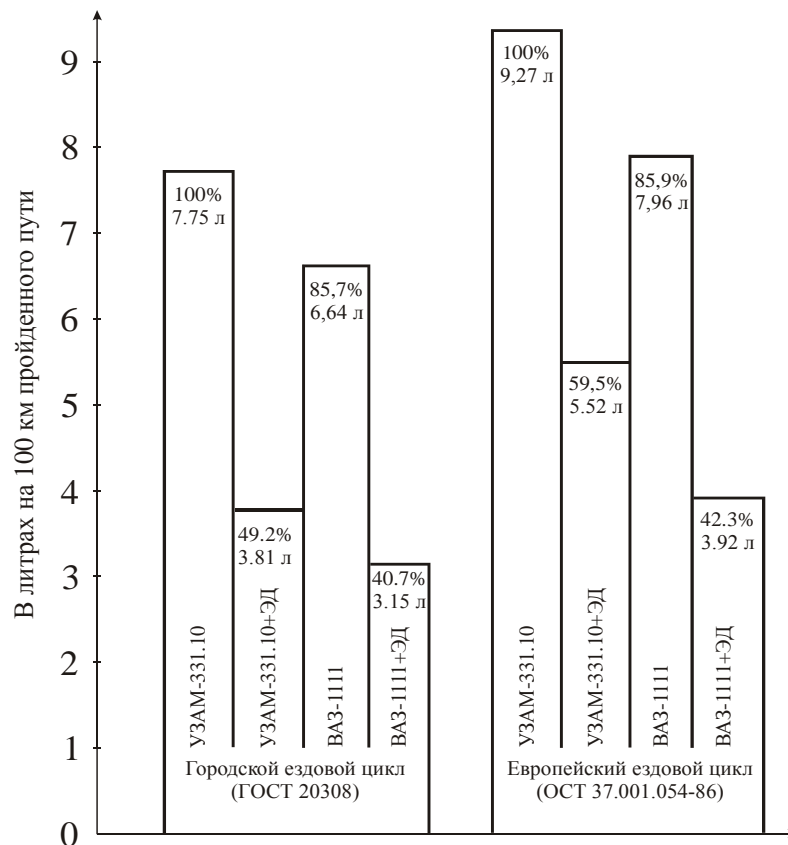


Рис. 5. Гистограммы расхода топлива автомобилем ИЖ-21261, оборудованным различными энергетическими установками

Одним из возможных упрощенных вариантов конструкции, структурная схема которой представлена на рис. 2, является применение вместо дифференциального согласующего редуктора планетарной передачи (рис. 6).

При совместной передаче крутящего момента через планетарный согласующий редуктор от ЭД и ДВС в соответствии с выбранной конструктивной схемой (рис. 6) необходимо обеспечить выполнение условия (исключить противовращение коленвала ДВС): $M_{\text{ЭД}} < 0.58824 M_{\text{ДВС}}$. При такой схеме имеется возможность за счет управления ЭД отказаться в конструкции от коробки передач и муфты сцепления, т.е. создать бесступенчатую электромеханическую трансмиссию.

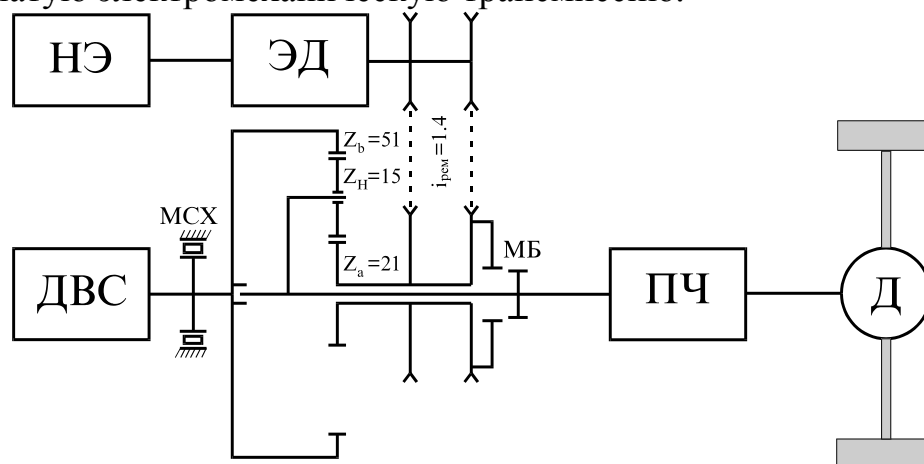


Рис. 6. Структурно-кинематическая схема автомобиля ИЖ-21261, оборудованного комбинированной энергетической установкой с планетарным согласующим редуктором

Обозначения на рис. 6: МСХ - механизм свободного хода для избежания возможного противовращения коленчатого вала ДВС от крутящего момента ЭД; МБ - муфта блокировочная для осуществления рекуперации энергии в процессе замедления-торможения, а также при подзарядке накопителя энергии при квазиустановившихся режимах движения.

Проведены расчетные исследования, направленные на определение численных значений требуемых от ЭД зависимостей крутящего момента, которые в свою очередь должны изменяться в зависимости от крутящего момента ДВС и условий движения автомобиля.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, оценки сходимости теоретических положений с экспериментальными данными для конкретной модели. С целью исключения отклонений, исходные данные расчетных исследований (конструктивные параметры автомобиля, нагрузочные и скоростные характеристики установленного на нем двигателя и т.д.) снимались с автомобиля ИЖ-21261, который в дальнейшем подвергался контрольным испытаниям с целью определения значений показателей топливной экономичности и скоростных свойств. Результаты расчетных значений мало отличаются от экспериментальных, и погрешность расчета составила не более 9 %. Это говорит о достаточно высокой степени адекватности разработанных математических моделей динамики движения реального легкового автомобиля с КЭСУ.

Были проведены контрольные заезды по определению эффективности работы пускорегулирующей аппаратуры с точки зрения контроля и подзарядки НЭ. Контрольный заезд на автомобиле с КЭСУ по загородным дорогам общего пользования протяженностью 154 км показал, что средняя скорость движения равна 65.3 км/ч при эксплуатационном расходе топлива 7.3 л на 100 км пути. При этом заряженность НЭ в процессе пробега не изменилась, что свидетельствует об ограничении запаса хода автомобиля ИЖ-21261 с КЭСУ только емкостью топливного бака.

Показатель расхода топлива легкового автомобиля с КЭСУ в городском ездовом цикле на динамометрическом стенде с беговыми барабанами на 25.4 % меньше в сравнении со значением 9.7 л на 100 км пути для автомобиля, оборудованного штатным ДВС. Запас хода только на НЭ составил 68 км, а максимально возможная скорость движения примерно 50 км/ч.

Гибридный автомобиль ИЖ-21261 проходил испытания на токсичность на тормозном стенде с беговыми барабанами фирмы Шенк (Германия). Выбросы вредных веществ в отработавших газах определялись с использованием газоанализатора МЕХА 2200 фирмы Хориба (Япония) по методике ОСТ 37.001.054-86 и ГОСТ 17.2.2.03-87.

Существующие требования по выбросу вредных веществ в отработавших газах предусматривают испытания автомобиля при работе двигателя на холостом ходу и в ездовом цикле. Результаты испытаний на холостом ходу согласно ГОСТ 17.2.2.03-87 приведены в табл. 3, а в ездовом цикле - в табл. 4.

Таблица 3 - Результаты испытаний гибридного автомобиля на холостом ходу

Частота вращения вала двигателя, мин ⁻¹	Предельно допустимое содержание окиси углерода (CO), объемная доля, %	Предельно допустимое содержание углеводородов (CH), млн ⁻¹	Результаты испытаний	
			CO	CH
N _{min}	1,5	1200	0,6	240
N _{пов}	2,0	600	1,3	110

Таблица 4 - Результаты испытаний гибридного автомобиля в ездовом цикле

Выбросы, г/км		Требования ЕВРО-2, г/км		Требования ЕВРО-3, г/км	
CO	CH+NO _x	CO	CH+NO _x	CO	CH+NO _x
2,1	0,45	2,2	0,5	2,3	0,35

Из приведенной таблицы следует, что автомобиль с КЭСУ обеспечивает выполнение норм ЕВРО-3 по выбросам CO. Это объясняется тем, что работа ДВС на гибридном автомобиле облегчается работой параллельно включенного электродвигателя.

Выполнение норм токсичности ЕВРО-3 по выбросам CH и NO_x будет обеспечено при разработке опытного образца за счет снижения массы гибридного автомобиля, дальнейшей оптимизации работы КЭСУ и оборудованием ДВС системой электронного впрыска топлива.

Расход топлива в городском режиме движения (заезды № 1, 2, 3) определялся в г. Ижевске на специальном маршруте. Этот маршрут имеет протяженность 40 км и включает в себя улицы с наиболее интенсивным движением транспорта, большим количеством светофоров, подъемов и спусков. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5 - Результаты испытаний гибридного автомобиля на топливную экономичность

№ заезда	Длина трассы, км	Время в пути, мин.	Средняя скорость движения, км/ч	Эксплуатационный расход топлива в городских условиях движения, л/100 км	
				Гибридный автомобиль	ИЖ-21261
1	40	80	30,07	6,9	9,8
2	40	85	28,57	7,08	9,88
3	40	88	27,2	7,15	9,9

Анализ результатов экспериментальных исследований (табл. 5) показал, что расход топлива автомобиля с разработанной КЭСУ (рис. 7) по сравнению с базовым автомобилем ИЖ-21261 в городском режиме движения уменьшается на 25 - 31 %. (Для справки: испытанный в ГНЦ НАМИ "гибрид" фирмы Toyota показал средний эксплуатационный расход 6,2 л на 100 км). Автомобиль обеспечивает максимальную скорость движения 90 км/ч, заложенную в техническое задание. Испытания в городе показали хорошую способность гибридного автомобиля набирать скорость и вписываться в поток движущихся автомобилей.

Экспериментальное определение значений топливно-скоростных показателей проведено в соответствии с ГОСТ 22576-77 «Автомобили и автопоезда. Номенклатура показателей скоростных свойств и методы их определения» и ГОСТ 20306-85 «Топливная экономичность автотранспортных средств. Номенклатура и методы испытаний».

Исследования на скоростные свойства проведены с помощью испытательного колеса "PEISELER R-S" (рис. 8), а для определения топливной экономичности применялся прибор "FLOWTRONIC 204".

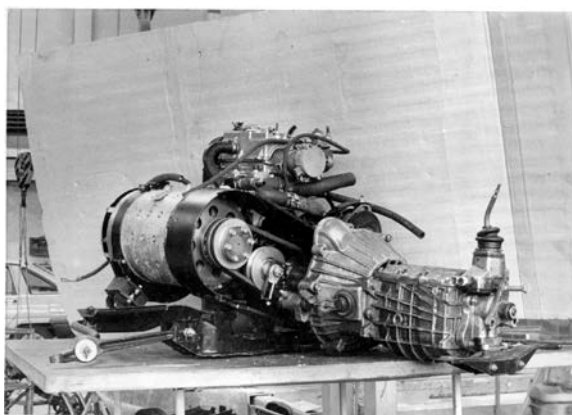


Рис. 7



Рис. 8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Параллельная компоновочная схема ДВС и электродвигателя, работающих на один выходной вал в комбинированной энергетической установке легкового автомобиля, является наиболее рациональной с точки зрения показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономичности.

2. Разработанные структурные схемы динамических моделей и системы дифференциальных уравнений работы автомобиля с комбинированными энергосиловыми установками параллельной компоновочной схемы ДВС и электродвигателя можно считать основой расчетных исследований такого типа автомобилей.

3. Для автомобиля типа ИЖ-21261 при создании комбинированной энергосиловой установки достаточно применить ДВС и электродвигатель мощностью соответственно не менее 20-21 кВт и 11.5-12 кВт.

4. Для легкового автомобиля класса B,C с разработанной энергетической установкой, состоящей из маломощного ДВС и электродвигателя, наиболее целесообразно применить в конструкции трехступенчатую коробку передач.

5. В алгоритме управления комбинированной энергосиловой установкой, реализованном в электронном блоке, наиболее рационально учитывать следующие параметры: частота вращения выходного вала комбинированной энергетической установки, значение угла открытия дроссельной заслонки, скорость движения и ускорение автомобиля.

6. Экспериментально установлено, что разработанная комбинированная энергосиловая установка позволяет повысить топливную экономичность автомобиля ИЖ-21261 в городском ездовом цикле на 25-31% при

одновременном уменьшении выбросов токсичных веществ с отработавшими газами ДВС на 35-40% .

7. Применение в конструкции комбинированной энергосиловой установки дифференциального согласующего редуктора ДВС и электродвигателя позволяет создать бесступенчатую электромеханическую трансмиссию, что подтверждается результатами расчетных исследований.

8. По расчетным данным, применение схемы с планетарным согласующим редуктором позволит снизить дополнительно расход топлива на 7-9% (по сравнению с разработанным автомобилем с гибридной установкой) за счет возможности реализации работы ДВС на более экономичных режимах, облегчит управление автомобилем и повысит безопасность его движения.

9. Расчетные значения показателей топливо-скоростных свойств автомобиля с комбинированной энергосиловой установкой отличаются от экспериментальных для всех рассматриваемых показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономичности не более чем на 9%.

10. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

- комплексного проекта «Экологический чистый городской автомобиль с гибридной силовой установкой» в рамках научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы в области транспорта» (2000 г.);
- гранта по фундаментальным исследованиям в области транспортных наук «Разработка научных аспектов комбинированной (гибридной) электросиловой установки с автоматической трансмиссией для микролитражного автомобиля» (руководитель В.А. Умняшкин) (1999-2000 г.г.);
- проекта «Разработка автоматической трансмиссии легкового автомобиля с гибридной энергосиловой установкой» в соответствии с подпрограммой «Транспорт» научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники».

Основные научные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Умняшкин В.А., Якимович Б.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Исследования электромеханических передач машин// Вестник ИжГТУ: Периодический научно-теоретический журнал Ижевского государственного технического университета. – Вып. 4. – Ижевск: ИжГТУ, 1999. - №4. - С. 30-32.

2. Умняшкин В.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Терентьев А.Н. Разработка научных аспектов комбинированной электросиловой установки с автоматической трансмиссией для микролитражного автомобиля// Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: Сборник докладов Международной науч.-техн. конференции БАЛТТЕХМАШ-2000. - Том II. - Калининград: КГТУ, 2000. - С. 11-12.

3. Экологически чистый городской автомобиль с гибридной силовой установкой (комплексный проект): Отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в соответствии с научно-технической программой Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы в области

транспорта». Код НИР: 05.03.01.31/ Ижевский Государственный технический университет; Руководитель работы В.А. Умняшкин. – Ижевск: ИжГТУ, 2000. - 118 с. - Отв. исполн. Б.А. Якимович; Соисполн.: Н.М. Филькин, Р.М. Галиев.

4. Умняшкин В.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Электромеханическая трансмиссия легкового автомобиля// Труды II международной научно-практической конференции «Автомобиль и техносфера» (JCATS'2001). - Казань: КГТУ-КАИ, 2001. - С. 433-437.

5. Умняшкин В.А., Якимович Б.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Анализ комбинированной энергосиловой установки легкового автомобиля с планетарным согласующим редуктором// Бесступенчатые передачи и механизмы свободного хода: Межвузовский сборник научных трудов.- Калининград: КГТУ, 2001. - С. 280-287.

6. Умняшкин В.А., Якимович Б.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Анализ работ по созданию гибридного легкового автомобиля, выполненных в течение 2000-2001г.г.// Тезисы докладов отчетной конференции-выставки подпрограммы 205 «Транспорт» научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» - М.: МАИ, 2001. - С. 232-234.

7. Разработка автоматической трансмиссии легкового автомобиля с гибридной энергосиловой установкой: Промежуточный отчет о научно – исследовательской работе, выполненной в соответствии с подпрограммой «Транспорт» научно-технической программой Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». Код НИР: 205.03.01.031/ Ижевский Государственный технический университет; Руководитель работы В.А. Умняшкин. Ижевск: ИжГТУ, 2001. - 84 с. - Отв. исполн. Б.А. Якимович; Соисполн.: Н.М. Филькин, Р.М. Галиев.

8. Умняшкин В.А., Якимович Б.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Анализ конструкций комбинированных энергосиловых установок машин// Вестник Уральского межрегионального отделения Академии транспорта №3. - Курган: КГУ, 2001.

9. Умняшкин В.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Особенности расчета передаточных чисел и количества ступеней трансмиссии легкового автомобиля, оборудованного комбинированной энергетической установкой// Вестник Уральского межрегионального отделения Академии транспорта №3. - Курган: КГУ, 2001.